

## FORMATION ET REDUCTION DES NO<sub>x</sub> LORS DE LA COMBUSTION DE SOLIDES

Yann ROGAUME

LERMAB UMR UHP-ENGREF-INRA

ENSTIB, 27, rue du merle blanc, BP 1041, 88051 EPINAL - FRANCE

(Reçu le 09/09/2002 – Accepté le 25/03/2003)

---

*Summary : Due to their important impact on the environment, the nitrogen oxides are studied since 30 years and three main mechanisms of formation have been considered. In this paper, we focus on the NO<sub>x</sub> formation and reduction during the combustion of various solids. The first result is that the prompt NO mechanism does not occur during this kind of combustion.*

*Depending of the solid and the conditions of combustion, nitrogen oxides can be formed according the two other mechanisms : fuel NO and thermal NO. For the first one, the yield of formation is directly dependant both on the nitrogen content of the solid and the oxygen level in the reaction zone. For the second one, the main parameter is the local temperature. The NO level obtained for various solids (coal, wood, plastics, char, ...) support this phenomenon.*

*In a second part of the paper, different techniques to reduce the NO emissions are presented and for two, some results achieved in our laboratory are shown. The stage-ment of the secondary air injection allows for example to reduce 25% of the NO emissions during municipal waste incineration. The second example is the recirculation of smokes mixed with the primary air injection – it allows both a reduction of NO and CO emissions (respectively 40 and 60%).*

*This way, some primary systems can reduce significantly the pollutants emissions and can be reached whatever the mechanism of formation.*

**Keywords :** Combustion, Nitrogen oxides, Reducing pollution, Solid combustion.

---

### I – INTRODUCTION

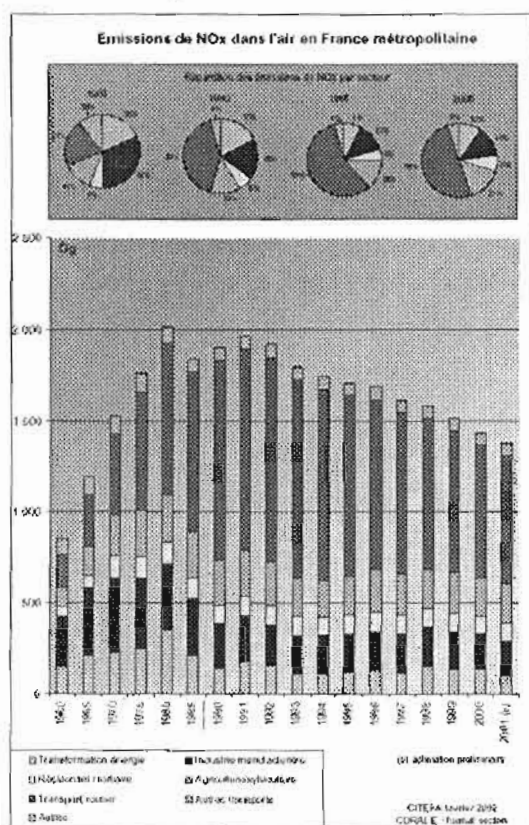
Le développement des activités humaines génère des pollutions de plus en plus variées et importantes. Cependant, les principales causes de pollution sont liées aux transports et aux diverses industries, que ce soit par l'intermédiaire direct de ces activités ou par l'intermédiaire des résidus issus de celles-ci. Parmi ces différents polluants, les oxydes d'azote tiennent une place primordiale car ils agissent sur de nombreux phénomènes tels que les pluies acides, les brouillards oxydants ou la destruction de la couche d'ozone.

## Emissions en oxydes d'azote

La catégorie des oxydes d'azote regroupe divers composés : le monoxyde d'azote (NO), le dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>) et le protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O) qui est tantôt pris en compte, tantôt non. Il est communément admis de regrouper ces trois gaz sous le sigle NO<sub>x</sub>, en négligeant la plupart du temps le N<sub>2</sub>O. Pourtant, cette espèce est quantitativement la plus répandue dans l'atmosphère et selon le type de combustion peut être très présente ou négligeable.

Les émissions mondiales en oxydes d'azote sont de l'ordre de 45 millions de tonnes par an, dont environ 1,4 millions de tonnes pour la France. L'origine de ces oxydes d'azote pour l'exemple français est présenté ci-dessous :

FIGURE 1 : Emissions de NO<sub>x</sub> dans l'air en France (source Citepa, [1]).



Comme le montre cette figure, la moitié des émissions de  $\text{NO}_x$  est due au transport routier et contenue dans les fumées issues de combustion dans les moteurs. Il est également intéressant de noter qu'en France, les efforts de réduction de la pollution ont permis de réduire de 30 % les émissions d'oxydes d'azote en 10 ans (entre 1990 et 2000).

### **Impacts des oxydes d'azote sur l'homme et sur l'environnement**

La nécessité de réduire les émissions de  $\text{NO}_x$  est directement liée à leur nocivité : ils participent à la formation de pluies acides, à l'apparition de brouillards oxydants et à la destruction de la couche d'ozone, sans oublier des effets directs sur l'homme à forte concentration : problèmes respiratoires avec le  $\text{NO}_2$  ou d'illarité avec le  $\text{N}_2\text{O}$ .

Les phénomènes de pluies acides sont dus à des réactions résidant dans la troposphère et initiées par des photons. Ces réactions aboutissent à la formation d'acide nitrique ( $\text{HNO}_3$ ) qui est ensuite assimilé par les nuages et abaisse le pH des pluies. D'après Bowman [2], il semble que les oxydes d'azote sont à l'origine de 30% des phénomènes de pluies acides.

Les brouillards oxydants sont dus à la fabrication d'ozone à basse altitude. Cet ozone peut selon les conditions géographiques et climatiques stagner dans des vallées ou au dessus de villes et provoquer ainsi des problèmes respiratoires.

Enfin, les oxydes d'azote participent également à la destruction de la couche d'ozone. Selon les sources, les  $\text{NO}_x$  sont responsables de 30 à 50 % des réactions de destruction de la couche d'ozone par l'intermédiaire des réactions d'oxydation et de réduction du  $\text{NO}$  et du  $\text{NO}_2$ . Le  $\text{N}_2\text{O}$  joue aussi un rôle important dans ces phénomènes en captant un atome d'oxygène de l' $\text{O}_3$  pour ensuite se transformer en  $\text{NO}$ .

L'objet de cet article est de présenter les mécanismes de formation et de réduction des oxydes d'azote lors de la combustion de divers combustibles solides. Même si les émissions dues à ce traitement ne

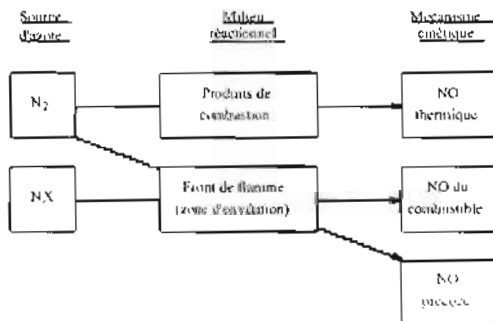
sont pas les plus importantes quantitativement, elles peuvent représenter des volumes non négligeables : par exemple, de nombreuses centrales électriques fonctionnent au charbon et le bois reste un combustible très utilisé pour l'énergie résidentielle.

Au sein des deux laboratoires de recherche (LERMAB et LCD), nous avons effectué de nombreuses études sur divers combustibles solides tels que les déchets, le charbon ou le bois et nous avons pu mettre en évidence des techniques de réduction des émissions adaptées à chaque combustible en fonction du ou des mécanismes réactionnels mis en jeu.

## MECANISMES DE FORMATION DU NO

Les recherches sur les mécanismes de formation des  $\text{NO}_x$  sont assez récentes (à partir de 1960-1970), même si le premier mécanisme, celui dit du «NO thermique» a été élaboré dès 1946 par Zeldovitch<sup>[3]</sup>. A l'heure actuelle, les trois mécanismes reconnus sont dits du «NO thermique», du «NO précoce» et du «NO du combustible». Ces mécanismes sont différents par l'origine de l'azote oxydé et par la zone de formation, ainsi que par le système réactionnel mis en jeu. Nous pouvons ainsi schématiser les processus :

FIGURE 2 : *mécanismes de formation des oxydes d'azote* [4]



### Le mécanisme du « NO thermique »

Ce mécanisme a été mis en évidence par Zeldovitch lors de ces travaux sur la combustion. L'azote mis en jeu provient ici du diazote contenu dans l'air, qui, sous l'effet de la température et de l'attaque d'un radical O<sup>•</sup> ou OH<sup>•</sup> se scinde et est oxydé en NO. Ainsi, les deux réactions principales de formation du NO selon ce mécanisme sont les suivantes :



Un troisième équilibre complète ce mécanisme qui est alors appelé mécanisme de Zeldovitch élargi :



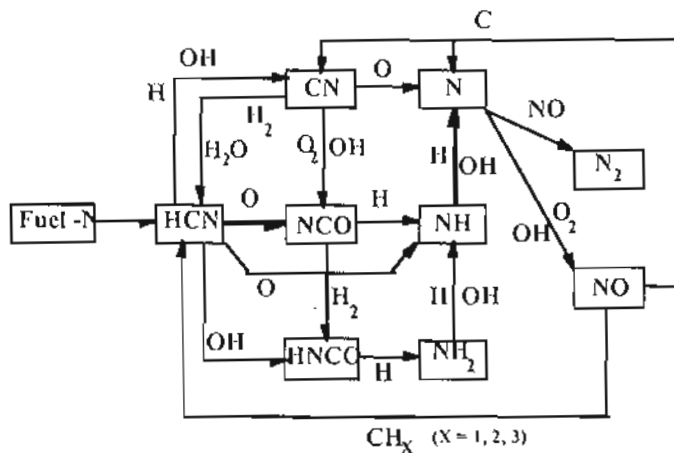
L'épithète «thermique» associé à ce mécanisme est dû à la forte énergie d'activation nécessaire pour rompre la liaison N≡N : cette liaison a une enthalpie de dissociation de 951 kJ.mol<sup>-1</sup>. Ainsi, une température élevée est nécessaire pour initier ces réactions : on considère habituellement que ces réactions de dissociation du diazote deviennent très fréquentes lorsque la température dépasse 1300 K ; cependant, elles peuvent avoir lieu à des températures inférieures. Le rendement de formation du NO par ce mécanisme dépend de deux paramètres principaux : le temps de séjour qui doit être suffisamment grand dans des zones chaudes pour initier les réactions de dissociation du diazote et la richesse locale du mélange qui conditionne la température de flamme et la présence de radicaux O ou OH.

### Le mécanisme du « NO du combustible »

La source d'azote est ici contenue dans le combustible. De nombreuses études ont été réalisées sur ce sujet et ont permis de mieux appréhender ce mécanisme. Lors de la décomposition du combustible sous l'effet de la chaleur, des espèces azotées légères de type HCN ou NH<sub>3</sub> sont libérées. Ce sont ces intermédiaires réactionnels qui vont

ensuite réagir avec l'oxygène ambiant pour former du NO puis du NO<sub>2</sub>. D'un point de vue général, le mécanisme peut être représenté sur le schéma ci-dessous présenté par De Soete en 1989<sup>[5]</sup>

**FIGURE 3** : Schéma réactionnel de formation et réduction du NO par le mécanisme du combustible.



Le rendement de production de NO par ce mécanisme dépend principalement de l'environnement local de la flamme : richesse et température.

Les études de Morley<sup>[6,7]</sup> et De Soete<sup>[8]</sup> ont montré que les deux principaux intermédiaires réactionnels azotés sont l'acide cyanhydrique (souvent majoritaire, notamment pour les produits contenant des cycles aromatiques) et l'ammoniac (principalement lorsque le combustible a des formes proches de celles d'amines).

Il faut également noter que la formation de NO selon ce mécanisme dépend très fortement de la richesse locale en radicaux oxygénés de type O ou OH. De Soete a donné une expression du rendement qui

montre bien cette dépendance vis-à-vis de la présence de ces radicaux et de la température :

$$\eta = \sqrt{\frac{k_{AO} X_{O_2}^b e^{-\frac{\theta_A}{T}}}{k_{BO} X_{NX_o}^b e^{-\frac{\theta_B}{T}}}} = \sqrt{\frac{k_{AO} X_{O_2}^b e^{-\frac{\theta_A - \theta_B}{T}}}{k_{BO} X_{NX_o}^b}}$$

$\eta$  = rendement en NO du combustible.

$k$  = facteurs préexponentiels des réactions A et B,

$X$  = fractions molaires des produits désignés,

$\theta$  = températures d'activation,

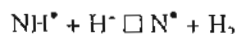
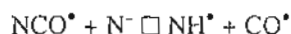
$T$  = température du milieu.

Les indices A et B se réfèrent respectivement aux réactions conduisant à la formation de NO par réaction d'espèces azotées et à la formation de diazote moléculaire par réaction de ces composés avec le NO lui-même. La différence  $\theta_A - \theta_B$  étant faible quelles que soient les énergies d'activation des composés azotés, la température n'a que peu d'influence sur ce rendement. En fait, la quantité de NO produite dépend principalement de la concentration en dioxygène du milieu, dont elle est une fonction croissante.

#### Le mécanisme du «NO précoce»

L'existence et la place de ce mécanisme dans certaines conditions ont été mises en évidence par Fenimore en [97][19] lorsqu'il s'est rendu compte que le taux de  $NO_x$  présents à la base d'une flamme de prémélange est non-nul. Il en a déduit qu'un mécanisme beaucoup plus rapide que le thermique prend place dans ce type de combustion. En fait, des radicaux hydrocarbonés réagissent avec le diazote de l'air

pour former des intermédiaires réactionnels de type HCN ou NH<sub>i</sub> qui réagissent ensuite avec l'oxygène pour former du NO selon le même schéma que dans le mécanisme du combustible. Ces réactions sont présentées ci-dessous, les deux premières étant les réactions initiatrices du phénomène :



Ce mécanisme mixte est surtout présent lors de combustion de gaz à hautes températures et dépend principalement de la présence de radicaux CH<sub>i</sub> et de la température locale.

#### Cas de la combustion de solides

Lors de la combustion de solides, le mécanisme de « NO précoce » est très peu présent. Cela est dû au fait que peu de radicaux hydrocarbonés légers sont présents : la décomposition de solide conduit à la formation de molécules souvent plus lourdes, qui sont ensuite décomposées lentement en radicaux CH<sub>i</sub>. Ces radicaux n'étant pas présents dans des zones propices à la formation de NO selon ce mécanisme, il est communément admis que ce mécanisme n'a pas lieu lors de la combustion de solides.

Ainsi, la majeure partie des NO<sub>x</sub> formés lors de la combustion de solides l'est par l'intermédiaire du mécanisme dit du « NO du combustible ». Bien entendu, cela dépend fortement de la teneur en azote du combustible, mais également des conditions de combustion. Plus le taux d'azote constitutif du solide est faible, plus la proportion de cet azote transformé en oxydes est importante : cela dit, les émissions de NO<sub>x</sub> augmentent avec le teneur en azote du combustible.



La formation d'oxydes d'azote selon le mécanisme du «NO thermique» lors de la combustion de solide est très variable. Celle-ci dépendant directement de la température, elle dépend du pouvoir calorifique du combustible et du type de foyer utilisé. De manière générale, nous trouvons des NO<sub>x</sub> thermiques lors de la combustion de charbons (les températures peuvent atteindre aisément 2000 K) et pas ou peu lors de la combustion de solides moins riches de type déchets ou biomasses humides.

La formation de NO lors de la combustion de solides dépend ainsi prioritairement de deux paramètres : teneur en azote du combustible et PCI, qui fixe la température de combustion.

#### Cas de différents solides

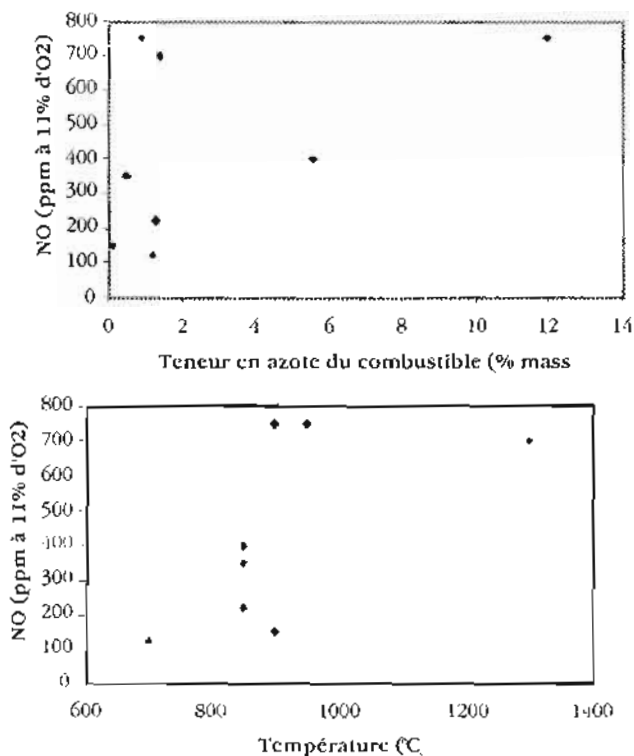
Dans cette partie, une comparaison des émissions moyennes en oxydes d'azote de différents solides est présentée. Ces résultats proviennent principalement d'essais réalisés dans nos laboratoires, mais également de quelques données bibliographiques, pour le charbon<sup>[10]</sup>, la lignite et l'antracite<sup>[11]</sup>. Le Combusther présenté est un charbon issu de la pyrolyse de déchets ménagers. Pour chaque cas présenté, la composition du solide est donnée avec la température moyenne de combustion afin de suivre le ou les mécanismes de formation (cf. tableau 1).

**TABLEAU 1 :** *Emissions en NO lors de la combustion de différents solides*

Combustible	Composition élémentaire massique				Température (°C)	NO (ppm à 11% O <sub>2</sub> )
	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)		
Bois	50	5,9	44	0,1	900°C	150
Déchets ménagers	52	8	38	0,5	850°C	350
Polyuréthane	59,8	9,3	23,1	5,6	850°C	400
Polyamide	63,2	9,8	15	12	900°C	750
Charbon	72	4,5	7,6	1,4	1300°C	700
Lignite	50,8	3,5	3,4	1,3	850°C	220
Antracite	51	1,4	8,5	0,9	950°C	750
Combusther	39,7	3,3	3	1,2	700°C	120

Les résultats présentés dans le tableau I font apparaître des liens complexes entre la production de NO, les températures et les teneurs en azote du combustible. En effet, aucun lien direct ne semble exister. Pour mieux comprendre les phénomènes, nous pouvons présenter les courbes d'émissions de NO en fonction de ces deux paramètres :

**FIGURE 4** : Emissions de NO en fonction de la température ou de la teneur en azote du combustible



Ces deux courbes montrent que l'influence de la température semble plus directe que celle de la teneur en azote du combustible. Ce résultat s'explique par le fait que quelque soit le mécanisme mis en jeu pour

former du NO, le rendement dépend de la température. A l'opposé, la teneur en azote du combustible joue un rôle moindre à partir du moment où la température de combustion est élevée, car à ce moment, c'est le mécanisme du NO thermique qui prend le dessus et qui devient prioritaire.

Nous pouvons ainsi décomposer la seconde courbe en deux parties :

- lorsque la température est inférieure à 900°C, les émissions de NO croissent lentement avec la température ;

- pour la température de 900°C, une grande différence apparaît entre deux valeurs (150 et 750 ppm corrigés à 11% d'O<sub>2</sub>). Cette différence est due à la forte différence de teneur en azote des deux combustibles testés : l'un est le bois avec une teneur en azote de l'ordre de 0.1 % alors que l'autre est le polyamide avec une teneur en azote de 12% ;

- lorsque la température dépasse 900°C, les émissions de NO semblent importantes, même si nous n'avons ici que deux points de mesures.

Sur la première courbe, nous avons fait apparaître les deux points correspondant à une température supérieure à 900°C en marques vides alors que les autres sont en marques pleines. Deux cas de figure apparaissent alors clairement :

- pour des températures inférieures ou égales à 900°C, la production d'oxydes d'azote dépend directement de la teneur en azote du combustible et croît avec celle-ci ;

- lorsque la température dépasse 950°C, les émissions en NO sont élevées quelle que soit la teneur en azote des solides brûlés.

Il convient donc, pour mettre en place des techniques de réduction des émissions de NO, de connaître les caractéristiques de combustion des solides choisis et notamment la température moyenne au sein du foyer. Il est important de noter que la température de combustion dépend également de la nature et de la géométrie du foyer et pas seulement du combustible. Les résultats présentés ici ne sont que des

moyennes et pour chaque combustible, des variations importantes des émissions de NO peuvent être obtenues selon les conditions opératoires<sup>[12]</sup>.

Ainsi, si la température dépasse 950°C, il peut être intéressant d'injecter des produits comme de l'eau pour la diminuer et réduire ainsi les émissions d'oxydes d'azote. A contrario, si le NO est formé selon le mécanisme du NO du combustible, il sera plus intéressant de mettre en place d'autres techniques plus adaptées.

### **Réduction des émissions de NO<sub>x</sub>**

De manière générale, deux types de techniques peuvent être utilisées : les techniques dites primaires pour lesquelles il s'agit de modifier les conditions opératoires de combustion pour réduire les émissions et les techniques secondaires dans lesquelles un apport ou un système extérieur permet de réduire ou de traiter les émissions.

#### **Techniques primaires**

##### **Réduction de l'excès d'air**

La formation d'oxydes d'azote, quel que soit le mécanisme mis en jeu, requiert la présence d'oxygène. Ainsi, en réduisant l'excès d'air, les teneurs locales en oxygène seront réduites en proportions et la formation de NO<sub>x</sub> sera moins importante. Cependant, cette technique est difficile à mettre en œuvre car elle peut rapidement conduire à des émissions d'imbrûlés importantes, que ce soit du monoxyde de carbone ou des poussières chargées en carbone.

##### **Étagement de l'injection du comburant**

Sur le même principe, l'étagement de l'injection de l'air comburant permet de limiter l'apport en oxygène dans des zones favorables à la formation de NO : zones dans lesquelles de nombreuses molécules azotées sont présentes et/ou zones de hautes températures.

L'étagement de l'injection d'air comburant provoque ainsi un allongement de la zone de combustion et un étagement des réactions d'oxydation. L'objectif est alors de brûler entièrement les molécules carbonées, ce qui demande une température minimum. sans oxyder les molécules azotées, ce qui demande une température suffisamment faible. Ainsi, cet étagement de l'injection de comburant conduit à une stabilisation de la température et à une oxydation maîtrisée des produits de dégradation du solide.

### **Étagement de l'injection de combustible**

Selon le même principe, il est possible de réduire les émissions en oxydes d'azote en étagant l'introduction de combustible dans le foyer. Dans ce cas, il faut séparer deux types de combustibles :

- pour les combustibles contenant une fraction azotée, ce procédé doit s'accompagner d'un étagement de l'injection d'air pour limiter la présence d'oxygène et a alors pour principal objectif de faire passer les oxydes d'azote formés dès le début de la combustion dans des zones réductrices (zones de décomposition thermique des solides) pour réduire le NO en N<sub>2</sub> ;

- pour les combustibles non azotés, deux effets peuvent agir sur la réduction des émissions de NO<sub>x</sub> : selon le même processus que précédemment, les oxydes d'azote préformés peuvent être réduits en passant dans des zones propices à ce phénomène ; mais cette technique permet également de réduire les dimensions des zones de hautes températures, limitant ainsi la formation de NO<sub>x</sub> par le mécanisme thermique.

### **Recirculation des gaz de combustion**

L'idée ici est reprendre une partie des gaz issus de la combustion pour les réinjecter en mélange avec l'air comburant ou avec le combustible. Dans la plupart des cas, une partie des fumées est réinjectée au niveau de la flamme en mélange avec l'air secondaire. L'influence est double : réduction de la température de flamme en injectant un volume de gaz comburant plus élevé pour une quantité d'oxygène

égale, ou diminution de la richesse en oxygène en injectant un volume de comburant constant. En pratique, les deux phénomènes agissent et la recirculation permet en même temps de réduire la richesse en oxygène et la température de flamme.

### **Techniques secondaires**

Les techniques dites secondaires peuvent se découper en deux principes : soit la réduction des  $\text{NO}_x$  se fait à l'intérieur du foyer, par adjonction d'un produit supplémentaire, soit la réduction se fait en aval du foyer par des procédés secs ou humides<sup>(13)</sup>.

A l'intérieur du foyer, deux grandes techniques sont utilisées :

- l'injection d'eau qui permet de réduire la température de flamme et qui est efficace pour endiguer le mécanisme du NO thermique ;
- l'injection d'un gaz de post-combustion, appelé également re-burning : du gaz naturel, du méthane ou de l'ammoniac sont souvent injectés, ce qui permet de réduire les émissions de NO en réduisant celui-ci en HCN ou  $\text{NH}_3$ , voire en  $\text{N}_2$ .

En dehors du foyer, des procédés de réduction peuvent être utilisés :

- des catalyseurs ou du charbon actif permettent par exemple de réduire le NO dans des procédés secs. Il est également possible de faire passer les fumées sur des molécules réductrices de type  $\text{NH}_3$  (c'est le procédé SNCR : réduction sélective non catalytique) ;
- des cycles d'oxydation – absorption - réduction plus ou moins complets permettent aussi de réduire les émissions polluantes.

Deux exemples d'application en combustion de solides

### **Étagelement de l'injection d'air en combustion de déchets**

Le travail de F. Jabouille en 1996<sup>(4)</sup> a été réalisé sur la combustion de déchets ménagers dans des conditions similaires à celles d'un four d'incinération de type four à grilles. Il a étudié l'influence de l'étagelement de l'injection de l'air en proposant un étagelement de l'air secondaire sur 1, 2 et 3 niveaux, pour des débits de combustible et de com-

burants constants et en faisant varier le rapport débit d'air primaire/débit d'air total ( $D_{AP}/D_{AT}$ ). Les résultats obtenus sur les émissions de NO sont présentés dans le tableau ci-dessous :

**TABLEAU 2 : Emissions en NO avec étagement de l'injection d'air secondaire**

Niveau(x) d'injection de l'air secondaire ...			
Rapport $D_{AP}/D_{AT}$ ...	1	2	3
0.6	90	65	62
0.7	85	75	70
0.8	90	85	70

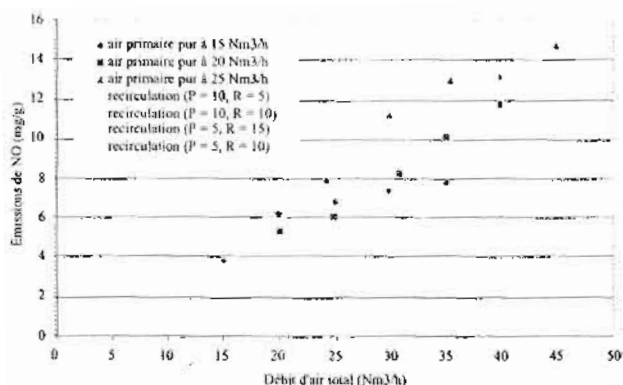
Ces résultats montrent une réduction moyenne de l'ordre de 25% avec l'étagement de l'air secondaire de 1 à 3 niveaux. Nous remarquons également que le rapport débit d'air primaire/débit d'air total ne joue pas de rôle important sur ces résultats, même s'il apparaît que les meilleures conditions sont obtenues pour un débit d'air secondaire assez important.

La réduction des émissions de NO est due ici principalement à la diminution des zones riches en oxygène : même si le débit d'air total demeure constant, chacune des zones de combustion est localement moins riche en molécules oxygénées, limitant ainsi la formation de NO.

### **Recirculation des fumées lors de la combustion de mousses de polyuréthane**

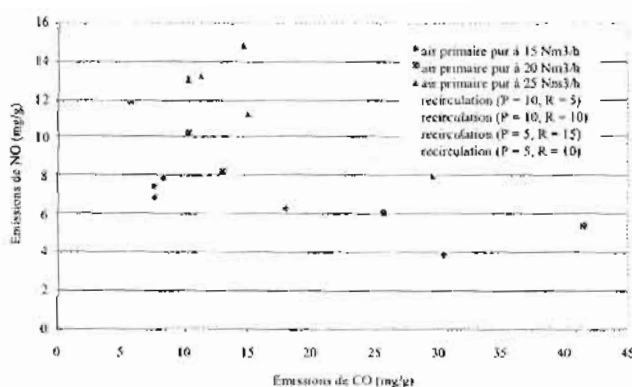
Ces résultats font partis d'un travail de thèse<sup>[4]</sup> sur les conditions de dégradation thermique et de combustion de mousses polyuréthanes issues de sièges automobiles. La technique utilisée ici pour réduire les émissions de NO<sub>x</sub> est la recirculation des fumées en mélange avec l'air primaire injecté sous la grille. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 3 ci-dessous :

FIGURE 5 : émissions de NO en fonction du débit d'air total avec ou sans recirculation.



Il apparaît clairement sur cette figure que la recirculation des fumées permet une nette réduction des émissions de NO, principalement pour des débits comburants élevés. Ce résultat est intéressant car la réduction du NO selon cette technique ne conduit pas à la formation d'imbrûlés plus importante. La figure 6 montre ce phénomène en présentant les résultats des émissions de NO en fonction de celles de CO.

Figure 6 : émissions de NO en fonction de celles de CO.





Cette figure montre qu'il est ainsi possible de réduire de manière conjuguée les émissions polluantes en CO et en NO [15]. La réduction des émissions de NO obtenue par cette technique est due à deux phénomènes :

- en injectant en comburant primaire un mélange fumées - air, la quantité d'oxygène introduit à cet endroit diminue et la formation de NO est ainsi rendue plus difficile :

- en injectant des fumées en air primaire, des molécules de NO préformées sont ainsi injectées dans une zone réductrice : manque d'oxygène et zone de décomposition du solide qui conduit à la formation de gaz réducteurs de type  $\text{CH}_4$ .

La réduction du NO selon cette technique passe ainsi par la formation de ces molécules, qui, en passant ensuite dans des zones réductrices, vont être réduites en  $\text{N}_2$ , lui même stable aux températures envisagées ici.

## CONCLUSION

Lors de la combustion de solides, deux des trois mécanismes de formation du NO connus peuvent concourir à la formation de ces molécules : le mécanisme du NO thermique, très présent pour des solides de forts pouvoirs calorifiques (charbon par exemple) et le mécanisme du NO du combustible, pour des solides azotés.

Pour réduire les émissions d'oxydes d'azote lors de la combustion de solides, il est donc nécessaire de passer par une première phase de détermination du mécanisme principal, afin de mettre en place les techniques de réduction appropriées. Certaines techniques semblent cependant adaptées aux deux mécanismes : c'est le cas de l'étagement de l'injection de comburant. La modélisation des processus de formation et réduction des oxydes d'azote lors de la combustion peut aussi permettre de mieux mettre en œuvre les techniques de réduction et de

développer de nouvelles méthodes<sup>[16]</sup>. Cependant, quel que soit le mécanisme mis en jeu, la réduction de la température et la baisse de la richesse en oxygène conduisent à la diminution des émissions de NO.

Il est intéressant de noter aussi que des techniques primaires peuvent permettre de réduire de manière significatives les émissions en NO : la recirculation des fumées a par exemple permis, sur la combustion de polyuréthane, de réduire de 60% les émissions de NO et de 30% les émissions de CO sans utiliser d'artifices secondaires de réduction.

## BIBLIOGRAPHIE

[1] - CITEPA, « Emissions dans l'air en France », Rapport du 18 avril 2002.

[2] - BOWMAN, « Control of combustion generated nitrogen oxides emissions technology driven by regulation », 24<sup>th</sup> International Symposium on Combustion, 1992.

[3] - ZELDOVITCH, « The oxydation of nitrogen in combustion and explosions », *Acta Physicochemica USSR*, 1946.

[4] - JABOUILLE, « Contribution à l'étude des facteurs d'émissions des oxydes d'azote lors de l'incinération de déchets ménagers », Thèse de doctorat de l'Université de Poitiers, 1996.

[5] - DE SOETE, « Mécanismes e formation et de destruction des oxydes d'azote lors de la combustion », *Revue générale de thermique*, 1989.

[6] - MORLEY, « The formation and destruction of hydrogen cyanide from atmospheric and fuel nitrogen in rich atmospheric-pressure flames », *Combustion and Flames*, 1976.

[7] - MORLEY, « The mechanism of NO formation from nitrogen compounds in hydrogen flames studied by laser fluorescence », 18<sup>th</sup> International Symposium on Combustion, 1981.

[8] - DE SOETE, « Overall reaction rates of NO and N<sub>2</sub> formation from fuel nitrogen », 15<sup>th</sup> International Symposium on Combustion, 1974.

[9] - FENIMORE, « Formation of nitric oxide in premixed hydrocarbon flames », 13<sup>th</sup> International Symposium on Combustion, 1971.

[10] - ANIFORA & Al., « Combustion of various coals », 6<sup>th</sup> International conference on technologies for a clean environment, 2001.

[11] - ARMESTO & Al., « Lignite and anthracite combustion », 6<sup>th</sup> International conference on technologies for a clean environment, 2001.

[12] - BERNARD C. & al., « Essais de combustion de bois en foyers fermés », 8<sup>o</sup> Journées annuelles de la SOACHIM, 2002.

[13] - REYDELLET, « Les mesures de réduction des oxydes d'azote en aval du foyer », Revue générale de thermique, 1989.

[14] - ROGAUME Y., « Physico-chimie de la dégradation thermique des molécules azotées : cas du polyuréthane et du polyamide », Thèse de doctorat de l'Université de Poitiers, 1999.

[15] - ROGAUME Y., « Thermal degradation and incineration of polyurethane : parameters to reduce the NO<sub>x</sub> emissions », 5<sup>th</sup> International Conference on Technologies and Combustion for a Clean Environment, 1999.

[16] - ROGAUME T., « Caractérisation expérimentale et modélisation de l'émission de polluants dans l'incinération des déchets ménagers », Thèse de doctorat de l'Université de Poitiers, 2001.